

研究展望

最近の地下水汚染について

RECENT ASPECTS ON GROUNDWATER POLLUTION

村岡浩爾*

By Kohji MURAOKA

1. はしがき

最近のように地下水汚染が社会的問題として大きく取り上げられたことは、これまでにはなかったことである。それはトリクロロエチレン (trichloroethylene, 略記 TCE), テトラクロロエチレン (tetrachloroethylene, 略記 PCE), 1,1,1-トリクロロエタン (1,1,1-trichloroethane, 略記 MTCE) などの揮発性有機塩素化合物 (以下文中では TCEs と略す) による地下水汚染を意味する。

これまで他の物質による地下水汚染はしばしば事件になり、その中に TCEs による汚染もないわけではなかった。まず、いくつかの文献^{1)~4)}によって、汚染物質別の地下水汚染をまとめてみると以下のようである。

- i) 病原菌等：赤痢菌，チフス菌，コレラ菌，大腸菌，流行性肝炎ウイルス等。
- ii) 重金属類：カドミウム，鉛，クロム，銅，ひ素，水銀，マンガン，鉄，亜鉛，シアン等。
- iii) 油 類：重油，軽油，ガソリン，ケロシン，廃油等。
- iv) 合成有機化合物：BHC, DDT, PCB, ABS, フェノール，パラチオン，クロルデン，臭化エチル，TCEs
- v) 放射性物質：³H, ⁹⁰Sr, ¹²⁹I, ¹³⁷Cs, ²³⁹Pu, ²²⁶Ra, 等。
- vi) 無機栄養塩類：硝酸性窒素，アンモニウム性窒素，

塩化物，硫化物，リン酸塩，等。

vii) その他：塩水化，熱汚染，濁質汚染

この中には、1937年、大牟田市で起こった水源井戸の汚染による水道赤痢事件で、死者約500名を出したという今では想像もつかないほどの事件もある。そのほか、重油の漏出、工場からのシアン、6価クロムなどの排出、農業による汚染など、さまざまな事件が発生しているが、汚染の原因及び動態からみれば、ほとんどがスポット的かつ一過性汚染であるとみなせる。これに対し、最近の TCEs による地下水汚染は、これまでの汚染と違った新しい型の地下水汚染といってよい。そのゆえんは以下のとおりである。

- ① TCEs は諸産業に有用な物質であり、これを扱う事業場は多い。したがって市街地では複数の汚染源により、その地下水は広域的に汚染されている場合が多い。
- ② 低濃度でも飲用を続けると人の健康を害する物質とみられ、トリクロロエチレンおよびテトラクロロエチレンは「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」において指定物質になっており、近い将来、第2種有害化学物質に指定されるとみられる。汚染に関する報道が盛んになってきたこともあって、これらの物質に対する住民のリスク認識も高い。
- ③ 低濃度かつ広域的な汚染であるから、汚染防止対策、汚染回復技術を含む地下水管理がきわめて困難であり、従来のスポット的かつ一時的対策などとは異なった手法や管理が要求される。

本文ではこのような背景を踏まえ、TCEs による地下水汚染に主体をおいて以下に論じていく。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (前・国立公害研究所水質土壌環境部長)
(〒565 吹田市山田丘2-1)

Keywords : groundwater pollution, chlorinated organic compounds, trichloroethylene, tetrachloroethylene

2. 汚染実態と地下水利用

1974年、アメリカ・ニューオーリンズ市の水道水からトリハロメタンが検出されたことを契機として、世界の水道水の分析が進み、その結果、アメリカ、イギリス、西ドイツ、オランダの地下水が、トリクロロエチレン等の有機塩素化合物で汚染されていることが判明した。1981年、アメリカ・カリフォルニア州サンノゼ市の通称シリコンバレーといわれる先端産業の集まる地域で、F・カメラ会社の地下タンクからトリクロロエチレンを含む有機溶剤が約220 m³漏出し、600 m離れた深井戸から5.8 ppmの高濃度でその物質がみつかった⁵⁾。漏出物質がすべてトリクロロエチレンとし、飲料水が飲料水基準濃度（暫定基準）0.03 mg/lで汚染されたとすると、一人一日100リットルの生活用水量とみれば、世界人口50億人の21日分の生活用水を汚染することになる。

わが国では昭和57年度に環境庁が全国大都市で1360本の井戸調査を行ったが、その結果は図-1にみるごとく、かなりの検出率でTCEsがみつかった。その後61年度までの追求調査によると、約1万2千本の井戸のうち、トリクロロエチレンについては3.3%、テトラクロロエチレンについて3.6%、1,1,1-トリクロロエタンについては1.8%の井戸で、水道水の暫定基準を超える濃度が検出され、全国各地でこの地下水汚染がみられることが確認された。これらの環境庁調査以前にもTCEsによる地下水汚染は知られており、日野市、八王子市、三鷹市、府中市、川崎市などの事例がある。それ以降、新聞などで大きく取り上げられた都市としては、熊本市、福岡市、太子町（兵庫県）、高槻市、京都市、大田市、仙台市などがあり、最も新しい事件としては、平成元年2月に新聞誌上に出た君津市の地下水汚染であろう。また、これらの汚染情報の拡大と並行して、地方自治体の環境部局やその研究所などにおいて調査や研究も進んでいる。外国においても、特に工業先進国においては日本と同程度の汚染状況にある。図-2はアメリカ環境白書

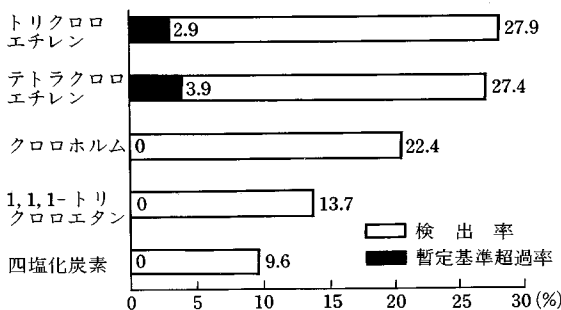


図-1 全国調査井1360か所の有機塩素化合物の検出状態（昭和57年度調査）

にみられた地下水汚染過程の説明図で、この種の汚染に関する防止対策の必要性を説いている。

地下水汚染が社会問題としてきわめて深刻なのは、いうまでもなく地下水が重要な水資源だからである。河川水等の重要な涵養源であると同時に、一般に水質が良好で水温の変化も少ないので水資源として高く評価されている。図-3にみられるとおり、渇水年水資源賦存量3300億m³のうち、生活・工業・農業用水には881億m³、26.7%が利用されているが、地下水の依存率は生活用水に対し24%、工業用水に対し40%を占める。これらは水道を通じて全国3000万人の飲料水となっているほか、そのままあるいは簡易な処理により約200万戸の家庭の飲料水ともなっている。また地下水は地盤や

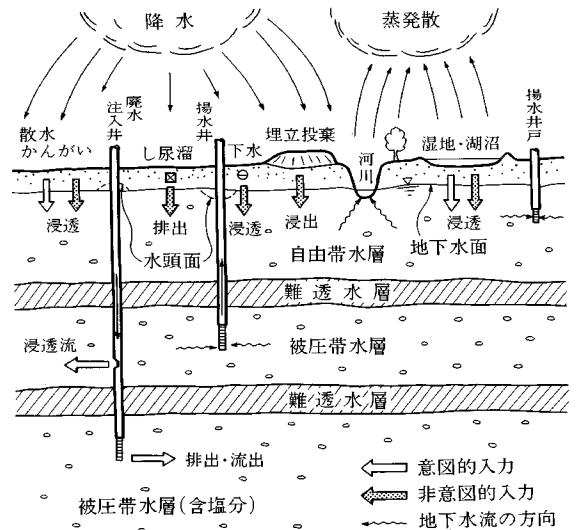


図-2 アメリカ環境白書に載せられた地下水汚染の概要説明図

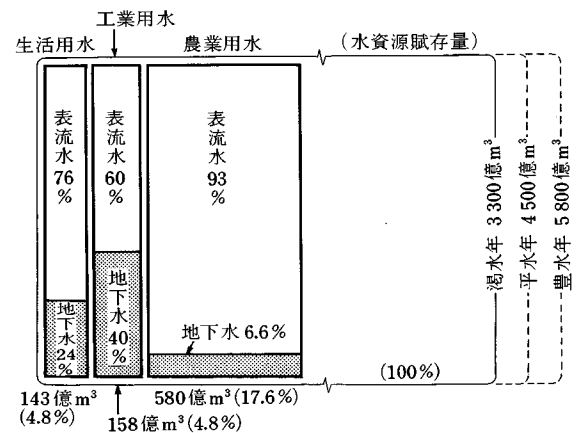


図-3 日本の水資源賦存量と水利用量（用水量は1983年の取水量ベース。地下水量は湧水量を含む。国土庁資料より作図）

土壌を安定させる働きを自然の中で行っているほか、災害等緊急時の水源としても重要であることはいうまでもない。

3. 有機塩素化合物の物理化学的性質とその有害性

地下水の汚染物質としての TCEs は、汚染機構や健康リスクを考えるうえで特異な性質をもっていると思われるので、これらについてまとめておく。表-1 は地下水汚染をもたらしている代表的な 5 種の TCEs と水の特性を示したものである。水と比較した特性は、

- ① 比重が水の 1.3~1.6 倍もあり、重い液体である。
- ② 蒸気圧が高く、常温でも揮発性に富む。
- ③ 水に対する溶解度が低い。
- ④ 粘性および表面張力が低く、多孔体の間隙の浸透は水よりも容易である。

ケミカル・アブストラクトに登録されている物質は、約 700 万種にのぼり、現在も毎月 1000 種程度ずつふえているといわれている⁶⁾。日本では約 2 万種の化合物が生産されている。これらの有害性や安全使用にかかわる法令には「特定化学物質等障害予防規制」「毒物劇物取締法」「廃棄物処理法」「労働安全衛生法」「農薬取締法」「有害物質を含有する家庭用品の規制に関する法律」など関係するものがかなりあるが、ここでは「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（1984 年改正）」による TCEs の有毒性の位置づけをみよう。この法律は、昭和 40 年代初期に生じた PCB 問題が契機となって、有害な化学物質による環境汚染を通じて人体に有害な影

響が生ずることを未然に防止することを目的として、1973 年に制定された。その後、TCEs による地下水汚染が顕在化し、WHO（世界保健機構）の発ガン性試験によって水道水に対する暫定ガイドラインが設定されたこともあって、1984 年に改正されたものである。これによると有害化学物質は、環境中での難分解性、生物濃縮性、慢性毒性の三条件を合わせもつ物質が第 1 種特定化学物質、生物濃縮性は高くはないが他の二条件を満足するものを第 2 種特定化学物質としている。現在、第 1 種には PCB, PCN, HCB, アルドリン、デイルドリン、エンドリン、DDT、クロルデンの 8 種は指定されており、よく知られているとおり、これらは非常に毒性の高いものである。一方、現在では第 2 種に指定された物質はない。しかし慢性毒性の疑いがある、これが確定されれば第 2 種になる物質を指定物質と称し、現在、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンを含む 32 種の化学物質がこれに指定されている。これらは動物実験の結果あるいはその科学的知見に基づいて審査され、トリクロロエチレンなどはやがて第 2 種特定化学物質になるものとみられる。

ところで TCEs の慢性毒性とはどの程度のものであろうか。本来、複数の動物による実験によってその知見を得るべきところ、わが国では十分な成果の集積がないため、外国の文献を参考にした資料⁷⁾によって、代表的な TCEs の例では次のとおりである。

[トリクロロエチレンの場合]

- ・発ガン性：マウスの経口投与では、雌雄とも肝細胞ガンと肝腫瘍が生じる。ラットの経口投与で

表-1 地下水汚染に関係の深い揮発性有機塩素化合物の主な物性

物質名	水 water H ₂ O	トリクロロエチレン trichloroethylene C ₂ HCl ₃	テトラクロロエチレン tetrachloroethylene C ₂ Cl ₄	クロロホルム chloroform CHCl ₃	1,1,1-トリクロロエタン 1,1,1-trichloroethane C ₂ H ₃ Cl ₃	四塩化炭素 carbon tetrachloride CCl ₄
慣用名		トリクレン	パークロエチレン パークレン		メチルクロロホルム	テトラクロロメタン パークロロメタン
分子量	18.01534	131.40	165.85	119.378	133.405	153.823
比重	{ 1.000000(4°C) { 0.9991005(15°C)	{ 1.4762 (15°C) { 1.4514 (30°C)	{ 1.63109 (15°C) { 1.60640 (30°C)	{ 1.49845(15°C) { 1.47988(25°C) { 1.47060(30°C)	{ 1.34587 (15°C) { 1.33760 (20°C) { 1.32096 (30°C)	{ 1.60370 (15°C) { 1.58439 (25°C) { 1.57480 (30°C)
蒸気圧[mmHg]	{ 12.788 (15°C) { 780.000(100°C)	47.31 (25°C)	18.47 (25°C)	194.8 (25°C)	120.7 (25°C)	115.2 (25°C)
溶解度 { in aq.%w { aq. in %w	{ — { —	{ 0.11 { 0.32	{ 0.015 { 0.0105	{ 0.815 { 0.072	{ 0.132 { 0.034	{ 0.077 { 0.010
粘性 [cs]	1.1374 (15°C)	{ 0.566 (20°C) { 0.532 (25°C)	{ 0.932 (15°C) { 0.798 (30°C)	{ 0.576 (15°C) { 0.514 (30°C)	{ 0.903 (15°C) { 0.795 (20°C) { 0.725 (30°C)	{ 1.329 (0°C) { 1.038 (15°C) { 0.845 (30°C)
動粘性係数 [cm ² /s]	1.1384 (15°C)	0.38557 (15°C)	0.57140 (15°C)	0.39774 (15°C)	0.59070 (15°C)	0.64725 (15°C)
表面張力	73.350 (15°C)	{ 29.5 (20°C) { 28.8 (25°C)	{ 32.86 (15°C) { 31.27 (30°C)	{ 27.16 (10°C) { 26.53 (25°C)	{ 26.17 (15°C) { 25.56 (20°C) { 24.25 (30°C)	{ 26.75 (20°C) { 26.15 (25°C)
沸点(at 1 atm)	100°C	87.1°C	121°C	62°C	74°C	76.8°C

は実験は不適當と考えられるため、発ガン性の有無の証拠は不十分である。

- 催奇形性：妊娠ラット群とマウス群に対する吸入暴露では、胎児の体重への影響など、骨格と内臓の奇形発生率の増加は観察されなかった。
- 変異原性：細菌および酵母に対し変異原性を示す。マウスの宿主経路アッセイでは、肝臓、腎臓より回収した酵母に突然変異と遺伝子転換を誘発する。マウスの体細胞スポットテストで変異原性がある。

[テトラクロロエチレンの場合]

- 発ガン性：マウスの経口投与では、雌雄とも肝細胞ガンが生じた。ラットの経口投与実験は不適當とみられ、発ガン性証拠は不十分である。
- 催奇形性：(トリクロロエチレンと同様の結果)
- 変異原性：細菌に対する突然変異原性はなかったが、酵母が高濃度のとき変異原性を示した。ヒトについてのデータは得られていない。

4. 有機塩素化合物の産業利用と地下水汚染経路

すでに述べたとおり、TCEsは多様な用途で有用される物質で、生産量は図-4に示すように最近ではトリクロロエチレン、テトラクロロエチレンは年間約7万tと安定している。昭和55年以降、1,1,1-トリクロロエチレンの生産量が増加しているが、これはこの物質がテトラクロロエチレンに比べておよそ30分の1程度毒性が少ないとされるため、代替物としての増加量を示しているとみられる。代表3物質の用途をまとめてみると以下のとおりである⁸⁾。

トリクロロエチレン：昭和9年からわが国で製造されており、約8割が塗装、電気メッキ、熱処理、

組立・分解等の前処理、圧延、引抜き、プレスの後処理として金属部品の脱脂洗浄用。油脂類や医薬品などの抽出剤、近年ではIC基板やブラウン管マスクの洗浄として飛躍的に利用。

テトラクロロエチレン：昭和27年頃より製造。約1/3がドライクリーニング用溶剤。一般金属の脱脂洗浄。ソフトな溶解力として電子部品やカメラ部品等の洗浄に利用。フロン113の原料。

1,1,1-トリクロロエタン：金属部品の洗浄。プリント基板現像液、染み抜きや文字の修正用インク、ドライクリーニングなど。

有機塩素化合物の中で最も消費量が多いのはジクロロエタンであり、1986年で250万トン以上である。このほとんどが塩化ビニール製造に利用されるが、毒性が低いこともあり、上記3者ほどには環境汚染は取り上げられていない。

これらTCEsの環境への侵入は、工場などの産業活動に伴って、定常的に排ガス、排水廃棄物を通じて行われるものと、工場の事故や交通事故を通じて突発的に生ずるものがある。定常的な侵入過程をごく一般的に示したものが図-5であって⁹⁾、使用工程の管理が十分であっても一部の大気への侵入は免れないし、その他の移動過程を通じて環境への侵入の危険はあるものとみられる。

1987年に行われた環境庁、厚生省、通商産業省、労働省が合同で行ったIC産業環境保全実態調査の結果では、トリクロロエチレン年間約7万tの使用量のうち、ICチップ製造前工程における使用量(51工場)は、年間3764tであって、その物質収支は次のようになっている。

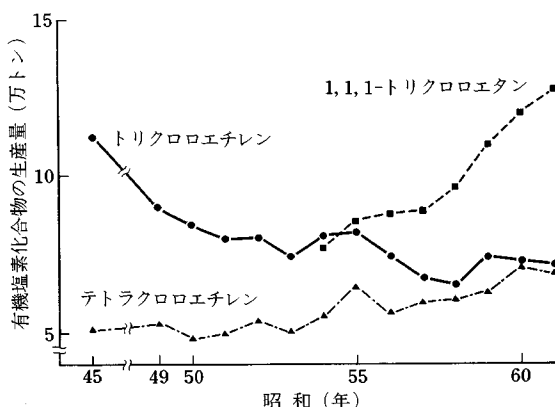


図-4 トリクロロエチレン等の生産量の推移

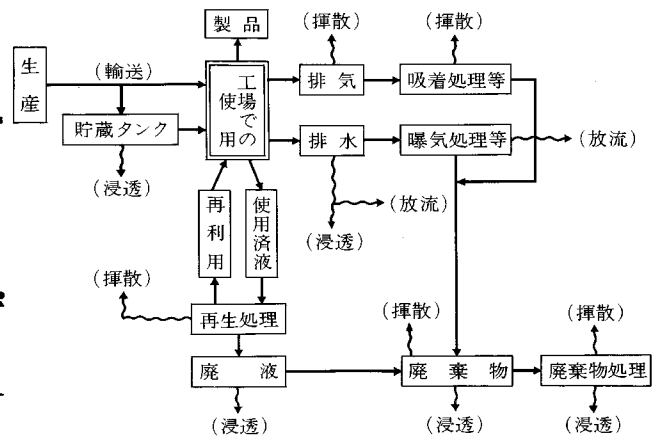


図-5 有機溶剤を使用する事業場周辺での物質の流れ

トリクロロ エチレン (3764 t)	排ガス	624.9 t
	排水	60.6 t
	処理(固形)	72.5 t
	処理(液状)	2958 t
	燃焼・焼却	48 t

このうち液状物としての処理量が多いが、この2/3は有価売却されて二次的に使用されている。この調査では、地下水汚染を生じている使用過程はみつかっていないが、現実に工場周辺の地下水が汚染されていることもあるため、その工程管理を十分に行うことが必要としている。

また、厚生省の調査によると⁸⁾、全国約5万7千のクリーニング店のうち、約8割は溶剤を使用している。テ

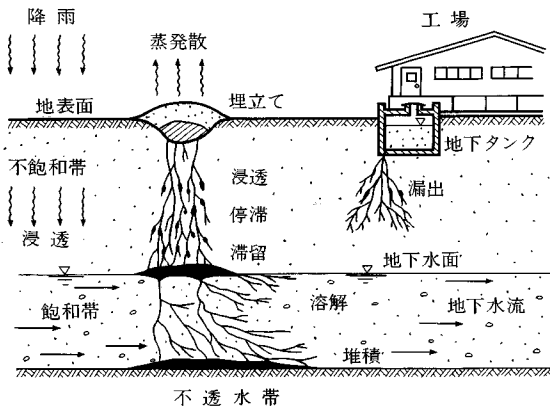


図-6 地下タンク漏出、埋立処分地からの有機塩素化合物による地下水汚染の概念図

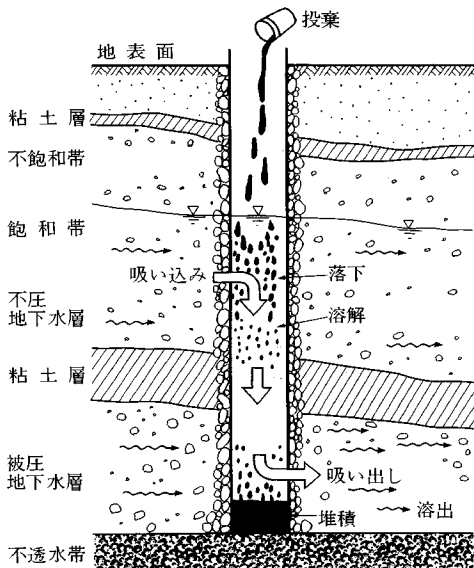


図-7 井戸に有機塩素化合物が投棄されたときの地下水汚染の概念図

トラクロロエチレン等の溶剤によるドライクリーニングは、一般にホットマシンとよばれる完全密閉型装置が使われる。この場合、100 kgの衣類をクリーニングするのに約6~8 kgの溶剤が必要で、その収支は次のように推定されている。

テトラクロロ エチレン (6~8 kg)	衣類に付着(大気へ)	1~2 kg
	排ガス	3.3~6 kg
	排水	1 kg 以下
	蒸発残渣(廃棄物)	1.5~2 kg
	フィルター(廃棄物)	

一方、突発的環境侵入としての地下水汚染経路はどのようなことが考えられるか。大抵は地下貯蔵タンクに漏出や排水施設の不備が気づかぬ間に生じていたというような事故によるものが多い¹⁰⁾。図-6は埋立地や地下タンクからの浸透や漏水による地下水汚染経路を想定したものである。特に地下タンクの漏出は、大事件に結びつくことが多い。また、物質収支において工場廃棄物として処分業者に渡り、適正な処理によって最終処分として埋め立てられるときには法的な安全性は保証されるが、処理が適正でない場合も考えられる。それに、TCEsの有害性が最近ほど知られていない時代に、廃棄物を事業所敷地内に埋められたり、埋立処分がなされたりしたことが実際にある。また図-7のように、不法に旧井戸に投棄されたことも考えられる。TCEsは水に対して溶解性が悪く、漏出や投棄は全量が短い時間に溶けきれないために、一過性でなく長期汚染を引き起こす結果を招く。低濃度で有害性をもつことと合わせ、ここにこの種の環境汚染の問題があるようである。

5. 地下水汚染機構に関する水理学的知見

(1) 水理学的問題の整理

表-1に掲げたごとく、TCEsは液体ではあるが水とは性質が異なる。しかし地下水汚染を扱う以上、水とこの液体とのかかわり合いを対象とすることになるので、水理学的な取扱いをするとき、どのような性状のものとして扱うかを整理しておく必要がある。

- a) TCEsが原液に近い状態のとき
 - ・水中での落下現象と水中への溶解
 - ・不飽和帯および飽和帯での鉛直浸透過程
 - ・飽和帯での重力変形
 - ・不飽和帯および飽和帯での水相への溶解
- b) TCEsが水に溶解している状態のとき
 - ・水中での拡散と混合
 - ・水中から気相への揮散
 - ・不飽和帯での浸透過程
 - ・飽和帯での移流と拡散

このように整理してみると、水理学的にはきわめて溶

解しにくい2つの液体が相互関連する力学を扱うことになるが、塩淡あるいは冷温のように、お互いにかやうにも混合し得る2流体の密度流的扱いは異なったものであることに留意する必要がある¹¹⁾。ここでは汚染空間と物質原液の挙動について、これまでの研究成果を紹介しよう。

(2) 水中での挙動

有機塩素化合物は水に対して難溶解性であるから、2液体が直接接すれば明瞭な界面を形成する。さらに粘性や表面張力は水よりかなり小さいため、外力に対してきわめて不安定であり、この特徴は物質原液を水中に落下させると粉碎することによく表われている。写真-1は着色したトリクロロエチレンやピペットでシャーレの水中に噴射したもので、勢いよく噴射すれば小粒子に碎ける様子がわかる。

写真-2はTCE原液を長さ3mのパイレックス製模型井に投下したときの様子を示している¹²⁾。投下したTCE量は各模型井に入れたときの深さが5cm(模型井容量の1/60)であり、井戸径の大きい順に392.7, 98.2, 24.5 mlである。写真のように、井戸径の大きいW-1とW-2では投下直後に粒径にして最大15mm程度の粒子に分裂し、水中を落下する。粒径によって沈降速度が違うから、粒子集団は落下に伴い分散する。ただ井戸径の最も小さいW-3では、側壁の影響を受けて粒子集団の先端は分裂せず、その落下速度も他に比べてやや小さい。

TCE落下後の井戸水の濃度も調べられている。平均濃度によると、W-1, W-2, W-3の順に141, 131, 119 mg/l(飽和溶解濃度1100 mg/l, 25°C)となり、この値からみれば確かにTCEは水には溶けにくい。ところが飲料水としての暫定基準値がきわめて低いところに設



写真-1 シャーレの水中に注入したトリクロロエチレン原液

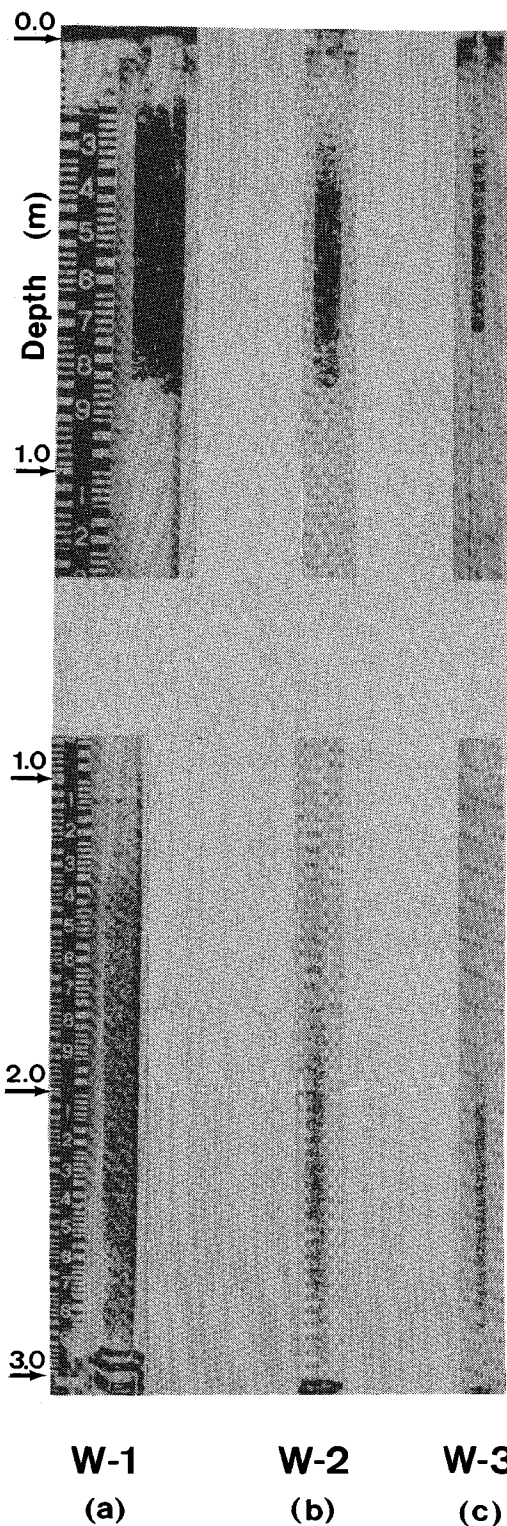
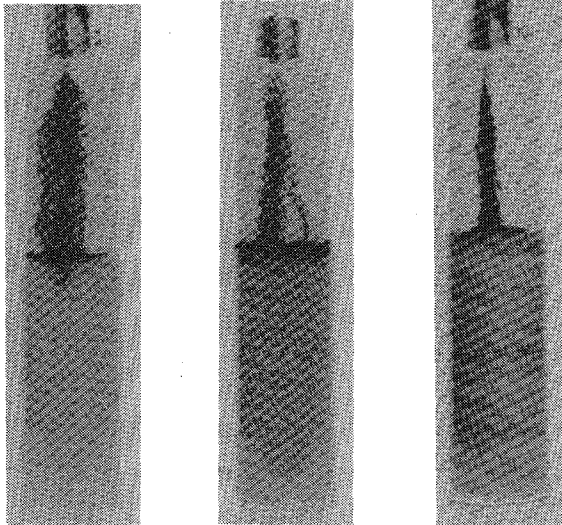


写真-2 模型井におけるトリクロロエチレン原液の落下の様子
(井戸径は写真左から10, 5, 2.5 cm, 深さはともに3 m)

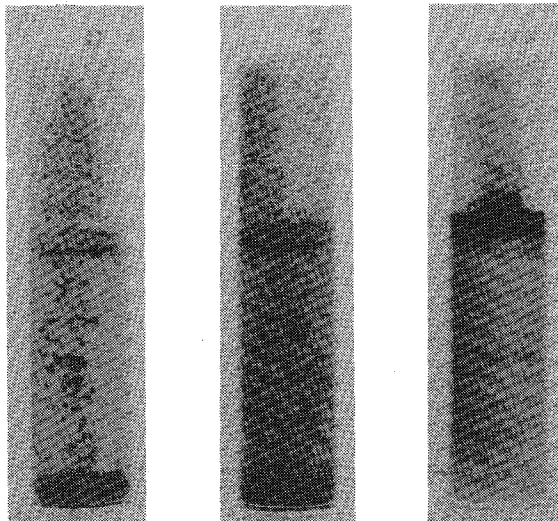
定されているから、これをベースにすると W-1 の実験では 4700 倍も井戸水に溶けていることになる。なお、クロロホルムについて同様の実験を行ったときの平均濃度は 465, 399, 380 mg/l (飽和溶解濃度 8150 mg/l, 20°C) であった。

(3) 不飽和および飽和帯での鉛直浸透特性

有機塩素化合物はサラサラした液体であり、土壌には



(a)



5 3 (mm) 1
(b)

写真—3 多孔体中でのトリクロロエチレン原液の浸透 (写真左からビーズ径は 5, 3, 1 mm, 深さは 30 cm)

水よりむしろ浸透しやすい性質がある。写真—3 はガラスビーズをモデル土壌粒子として、TCE 原液の浸透現象をカラム実験で調べた結果であり、カラム上層を不飽和、下層を飽和としている¹³⁾。不飽和帯ではいずれのビーズ径でもきわめてスムーズに浸透し、地下水面に達する。浸透速度は粒径 5, 3, 1 mm の順に 9.0, 6.0, 4.5 cm/s であった。

しかし、不飽和帯から飽和帯に移行する毛管領域で浸透の様子が異なる。粒径の大きい 5 mm と 3 mm では飽和帯にも侵入し、粒子と粒子の間隙に残留する。飽和帯中で有機塩素化合物が架橋状態で残留する現象は神野ら¹⁴⁾によっても報告されている。一方 1 mm 径では TCE 原液は飽和水面上に溜り、容易には飽和帯中に侵入しない。ただこの場合でも飽和水面を上下に振動させれば、TCE 原液は飽和帯中に侵入する。

以上の現象は、一樣粒径にそろえた砂粒子を用いた実験でも同様である。しかし、鹿沼土のように団粒状態の多孔体を用いたときは、それぞれの団粒に微孔隙があるため、不飽和状態ではその孔隙内にも浸透することが明らかにされている。これは黒ボク土など実際の土壌でも、団粒構造が発達していれば有機塩素化合物は団粒構造内に浸透し、保持されることを示唆している。

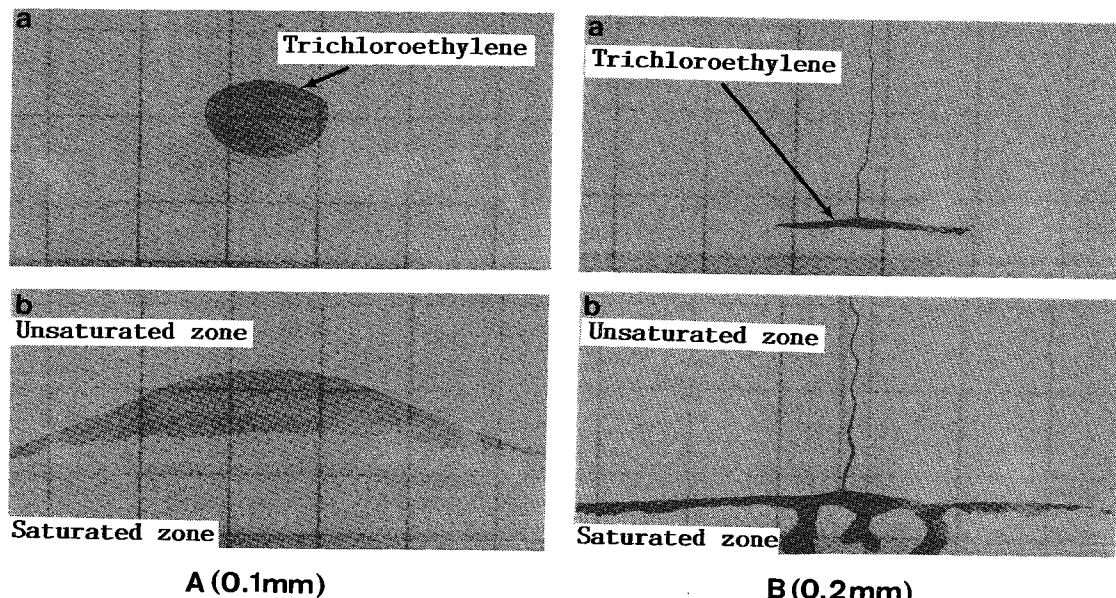
毛管帯付近の浸透現象を模擬する手法にヘルショウモデルがあり、石油鉱物や有機塩素化合物の浸透現象に応用した Schwille¹⁵⁾ や Hirata・Muraoka¹³⁾ の研究がある。写真—4 は 2 枚のガラス板を合わせて立て、TCE 原液の浸透現象を可視観測した結果である。ガラス板間隙 0.1 mm の場合には不飽和帯 (毛管帯上方にある空隙部) を浸透してきた TCE は毛管帯上に溜り、追加された TCE によってその層厚は増すことがあっても、飽和帯には侵入しない。これは粒子が小さく、空隙規模の小さな多孔体中での浸透現象 (写真—3 の 1 mm 径) に相当するとみられる。

一方間隔 0.2 mm の実験では、TCE 原液の自重と毛管力の均衡の破れた部分でフィンガーが発達し、そこから TCE 原液は飽和帯中に侵入する。空隙規模の大きい多孔体場 (写真—3 の 3 mm 径と 5 mm 径) ではこれに近い現象が生じていると考えられる。

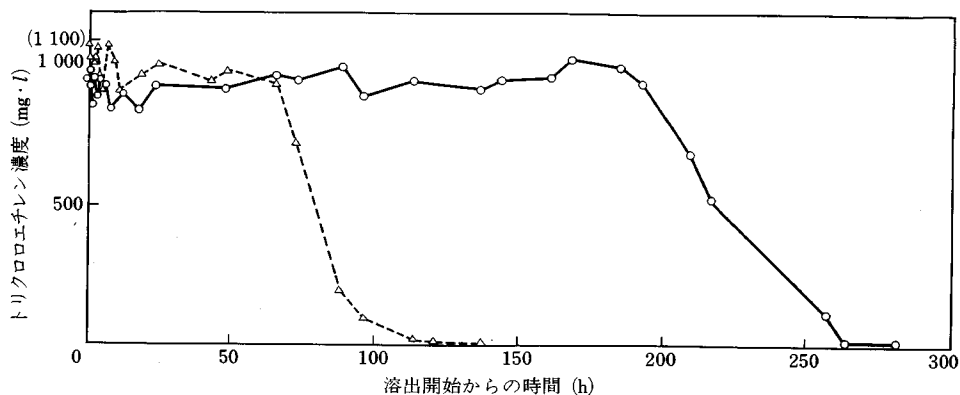
(4) 降雨浸透による溶解特性

有機塩素化合物は土壌に浸透しやすく、団粒構造があれば、その中に残留することは既述した。それでは、こうした状態に降雨浸透があれば水移動に伴って有機塩素化合物が溶出するのかどうか、溶出すればどの程度の濃度になるかを知る必要がある。ここでは円筒カラムを用いた溶出実験を紹介しよう¹⁶⁾。

実験は内径 60 mm, 深さ 20 cm のパイレックス製カラムに乾燥状態の鹿沼土を詰め、あらかじめ所定量の



写真—4 ヘルシヨウモデルによるトリクロロエチレン原液の浸透 (ガラス板間隔は $A=0.1\text{ mm}$, $B=0.2\text{ mm}$ で、写真中のメッシュは $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$)



図—8 土壌からのトリクロロエチレンの溶出 (○：トリクロロエチレン 6 g , △：同 2 g 注入。降雨強度はともに 10 mm/h 。トリクロロエチレンの溶出率は約 70%)

TCE 原液をカラム円筒断面内にほぼ一様に注入しておく。実験系は TCE が揮散しないよう完全な閉鎖系の実験とし、カラム上方から降雨に見立てた純水を滴下し、カラム底からの浸出液を調べる。結果は図—8 に描いてあるが、浸出開始時から 1000 mg/l のきわめて高濃度になっており、注入量の多い方が濃度の持続時間も長い。また 1000 mg/l の濃度は表—1 にあるように TCE 原液の水に対する飽和溶解度に近い。これは TCE 原液が鹿沼土の孔隙内に浸透することによって、水との接触面積や接触時間が大きくなったためとみられる。なお、TCE の初期注入量を一定とし、降雨強度を考えた実験も行われている。

(5) 地下水流れによる溶解特性

間隙規模が大きいときには TCE 原液は地下水中に侵入し、間隙中に残留する。また間隙規模が小さい場合には、地下水面上に溜ることになるが、これらの状態から地下水流れによる TCE の溶出現象を調べるには、基礎的な実験として、多孔体中に水と TCE 原液の二層系を作り、流れの状態と TCE 溶出濃度との関係を明確にしなければならない。

地下水流れを対象にしているから、流速はきわめて小さく、実験中に有機塩素化合物が揮散しないよう、閉鎖系のガラス製管路実験を行う必要がある。図—9 は長さ 20 cm 、深さ 5 cm 、幅 5 cm の長方形管路内にガラスビーズを充填し、水-トリクロロエチレン原液の多孔体二層

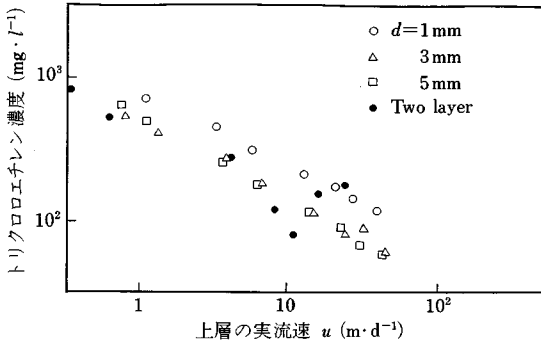


図-9 上層流速と溶出速度の関係

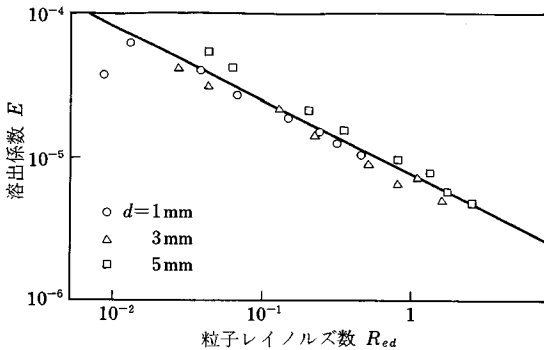


図-10 多孔体二層系における溶出係数と粒子レイノルズ数の関係

系実験で得られた溶出濃度と上層(水)の実流速 u の関係を示した¹⁷⁾。実験には平均粒径 d が 1, 3, 5 mm の 3 種類のガラスビーズを使用し、層厚は上・下層とも 2.5 cm としている。また比較のために、多孔体でない水-TCE 原液二層系での溶出濃度も図中に ● (Two layer) として記した。この実験でも先と同じガラス製管路を用い、上層厚は 1.3 cm, 下層厚は 3.7 cm である。

図示のように、実流速 u が大きいほど、すなわち水と TCE の接触時間が短いほど、溶出濃度は低くなっている。また粒径 5 mm と 3 mm の溶出濃度は水-TCE 二層系の実験結果と大差ないが、粒径 1 mm の溶出濃度は前三者より若干高い値をとっている。

そこで、粒子レイノルズ数 $Re_d (=ud/\nu)$ 、ここに、 u : 上層の実流速、 d : 平均粒径、 ν : 水の動粘性係数) に対して、溶出速度 $u_e (= \rho_1/\rho_2 \cdot h/L \cdot u)$ 、ここに、 ρ_1 : 流出水の密度、 ρ_2 : TCE の密度、 h : 上層水の厚さ、 L : 両層の接触長さ) を上層の実流速で除した溶出係数 $E = u_e/u$ を整理すると図-10 となる。両者は両対数上で直線関係にあるから

$$E = 7.41 \times 10^{-6} \cdot Re_d^{-0.515} \dots \dots \dots (1)$$

で表現することができる。

6. 地下水汚染分布の動態解析

(1) 追跡解析法の概要

地下水水理学, 地下水水文学, 地下水流シミュレーションについては、それぞれ明解な参考図書¹⁸⁾⁻²⁰⁾のほかにかきわめて多くの文献があり、そこでは地下水水質の一般論も扱われているため、それらをここに紹介する必要はあるまい。しかし、地下水汚染、それもいまままでに論じてきた有機塩素化合物による汚染については総括的な参考図書はなく、ややトピック的に扱った図書^{21), 22)}以外は政府関係刊行物、各種の専門雑誌、国際シンポジウム論文集などにみられるが、いまだ集大成されていない。これらを文献検索等で調べていくと、地域の地下水汚染の動態に関してもいくつかの有益な知見にふれることがあり、それらは次項に紹介されている。

地域の地下水汚染の動態を理解するには、流動や水量的な現象を把握するため、地形環境、地質環境、水文環境など地球科学的要因を理解することはもちろんであるが、これとは違った視点からのアプローチも必要であることを新藤²³⁾は述べている。それによると、地下水汚染問題は特に時間と空間についての認識が重要で、発生源と発生場の地理的、時系列的関係が調べられねばならないこと、汚染物質の物理的、化学的性質をふまえて地下水の汚染に至る経路とその後の動態の把握が必要なことである。このうち、水理学的な実験を通じて得られるいくつかの知見についてはすでに述べたので、やや広域的な場での現象を述べていくことにする。

TCEs の地下水汚染を数学モデル上で考察するとき、特殊な扱いをする二、三のポイントをまとめてみたい²⁴⁾。

物質移動の基礎式はよく知られているように

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (C \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + R + \sum_{k=1}^s R_k \dots \dots \dots (2)$$

(時間変化) (移流) (分散) (発生・消滅) (反応)

で表わされる。ここに、 u_i : 空隙流速の平均値ベクトル、 C は濃度である。多孔体流れにおける水理学的に扱われる主方向の分散係数 D_i^* は、その多孔体流れ機構の議論に始まってベクレ数あるいは透水係数との関係で表わすことができる^{25), 26)}。しかし地域の地下水汚染では、均質な多孔体というような局所的なものではなく、種々の多孔質の集合という観点から、ランダム輸送の考えが成り立つマクロな場での統計学的アプローチが有効で

$$D_i^* = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_i^2}{\partial t} = \frac{1}{2} \bar{u}_i \frac{\partial \sigma_i^2}{\partial x} = \alpha_L \cdot \bar{u}_i \dots \dots \dots (3)$$

で定義する分散能係数 α_L が実用的な係数となる。ここに、 σ_i^2 はトレーサの拡がりに関する統計学的分散である。

次に TCEs には吸着現象があることである。吸着には種々の形態があるが、TCEs を含む低濃度の溶液の被吸着体（土壌粒子など）に対する吸着は、イオン交換と同類の定式化が可能であり、交換係数 K_a は

$$K_a = dq/dC \dots\dots\dots (4)$$

で表わされる。ここに、 C は溶液中の溶解物質の濃度 [M/L³]、 q は吸着反応が終わった平衡状態の土壌の乾燥重量に対する重量濃度 [M/M：無次元量] である。式 (4) は近似的に $K_a = q/C$ とみなせるが、 q と C の関係を表わす吸着等温式が Henry 型である場合にはこれは正しい。

TCEs は土壌粒子そのものへの吸着はほとんどなく、土壌に含まれる有機炭素に吸着するものとみられ、有機炭素の質量濃度を (OC) とすると、

$$K_a = K_{oc} \cdot (OC) \dots\dots\dots (5)$$

という簡単な関係があることが知られている²⁷⁾。ここに K_{oc} は比例定数で、対象化学物質の有機炭素に対する分配係数である。さらに各物質の K_{oc} はそれぞれのオクタノール/水・分配係数 K_{ow} とよい相関があり、二、三の提案式を示すと次のようである²²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \log K_{oc} &= 1.00 \log K_{ow} - 0.21 \quad (\text{Karickhoff ら}) \\ \log K_{oc} &= 0.72 \log K_{ow} + 0.49 \quad (\text{Schwarzenback ら}) \\ \log K_{oc} &= 2.00 \log K_{ow} - 0.317 \quad (\text{Means ら}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

また、代表的な有機塩素化合物のオクタノール/水・分配係数 K_{ow} は表—2 に示すごとくである。

このように分配係数 K_a が定まるとすれば、吸着現象を伴う移流分散式が誘導され²⁴⁾、その結果式 (2) は主流方向を x 軸と考えて次のように変わる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\bar{u}_L}{R_a} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{D_x^*}{R_a} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{D_y^*}{R_a} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{D_z^*}{R_a} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + R \dots\dots\dots (7)$$

$$R_a = 1 + \frac{\sigma_b}{n} K_a \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 n ：空隙率、 σ_b ：多孔体の見掛けの密度（バルクの密度）、 R_a を遅れ係数とよぶ。 R_a は吸着があると常に 1 より大きいため、通常の移流分散に比べ移流速度

表—2 主な有機塩素化合物のオクタノール/水・分配係数 K_{ow}

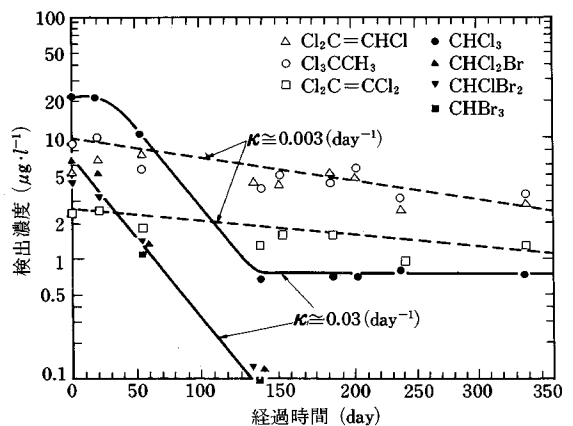
化合物	分子式	($\log K_{ow}$) ± (標準偏差)
クロロホルム	CHCl ₃	1.95 ± 0.02
四塩化炭素	CCl ₄	2.72 ± 0.15
ジクロロジフルオロメタン	CCl ₂ F ₂	2.16
トリクロロエチレン	C ₂ HCl ₃	2.29
テトラクロロエチレン	C ₂ Cl ₄	2.60
1,1,1-トリクロロエタン	C ₂ H ₃ Cl ₃	2.49
クロロベンゼン	C ₆ H ₅ Cl	2.49 ± 0.33
2,4,5,2',4',5'-PCB	C ₁₂ H ₄ Cl ₆	6.72
DDT	C ₁₄ H ₉ Cl ₅	4.98 ± 1.16

は小さく、分散係数も小さくなり、特徴のある輸送形態となる²⁸⁾。次に考えるべきことは、式 (2) または式 (7) の R で表わされる発生・消滅の現象が TCEs にみられるかどうかである。放射性物質のように半減期 T_{50} がわかっているような場合には $\lambda = \ln 2 / T_{50}$ より $R = -\lambda C$ とおくことができる。TCEs の消滅は、もしあるとすれば微生物による分解によるものであり、一例としてトリハロメタン、クロロホルムは $\lambda = 0.03 \text{ day}^{-1}$ 、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンは $\lambda = 0.003 \text{ day}^{-1}$ 程度との報告もあるが²⁹⁾、各種土壌細菌による有機塩素化合物に関する量的な研究はまだ始まったばかりである³⁰⁾。

(2) 井戸を用いた調査

地下水の水質は井戸から試水を採取し、分析する。ただ一口に井戸といっても、対象とする帯水層にのみストレーナを設け、その上・下端を綿密にシーリングした観測井もあれば、複数の帯水層にストレーナを設け、揚水を目的とした井戸もある。特に前者の観測井は、掘削時に得られる水理地質資料に加えて、複数の観測井を組み合わせれば、トレーサ実験も可能である。

地下水の涵養試験も、観測井を適切に配置しておけばトレーサ実験として利用することができる。わが国ではあまり報告されていないが、アメリカでは生活用水の 50% を地下水に依存していることもあって、処理水を注入原水とした涵養試験がしばしば実施されている。原水に含まれている物質、たとえば DO や COD、トリクロロエチレンやテトラクロロエチレン、トリハロメタンなどの流下方向の濃度変化を各観測井で描けば、注入水の滞留時間、吸・脱着に由来する遅れ係数や微生物分解についての情報が得られることがある。図—11 はサンフランシスコ湾に面した Palo Alto 試験地で得られたトリクロロエチレン、クロロホルムやトリハロメタンの濃



図—11 観測井で得られた有機塩素化合物の見掛けの減少速度 (注入井との距離は 8 m (Roberts, 1982))

度変化を示したものであり、この図に描かれた濃度減少率から、既述したクロロホルムやトリハロメタンの見掛けの減少速度が求められている²⁹⁾。

ある地域で地下水汚染がみつかったも、対象地域内には上に述べたような観測井はまずないとみてよい。こうした場合には、既存の揚水井から地下水を採取すること

になるが、このとき、問題としている帯水層にのみストレーナを設けている井戸を選び出す必要がある。また有機塩素化合物による地下水汚染は健康影響にかかわる問題だけに、対象物質の濃度はきめ細かく調べられているが、これに主陽イオンとして Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、主陰イオンとして HCO_3^- 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} などのイオンバランスの取れる程度に一般水質項目も調べておけば、地下水流れや滞留時間について情報が得られる³¹⁾。さらに水質の経時変化を追跡することも重要である。図-12はトリクロロエチレンで汚染された地域で、浅層地下水の濃度と地下水位の関係を示している³²⁾。たとえば定点5の井戸では地下水位が4.5mより下がると濃度は急激に増加し、この付近に侵入したトリクロロエチレンが季節変動に伴う地下水位の低下で溶出することがうかがえる。

(3) 地表面からの探査

地域地下水で汚染がみつかったも、汚染の拡がりを捉えることはきわめて困難である。地下水流れがよくわからないことに加えて、井戸がなければ地下水質を調べることができず、この井戸も対象地域内に適切に配置されているとは限らないからである。こうしたとき、地表面から探査できれば、飛躍的に情報量が増すことになる。これには物理的手法と地球化学的手法がある。

物理的な手法に、電気的な地層比抵抗を測定する方法がある。これは礫層など水を通しやすい層の比抵抗は大きく、シルトや粘土など水の滞留時間の長い部分では比抵抗が小さくなる性質を利用したものであり、電極間隔を変えれば深度ごとのだいたいの比抵抗値を調べることができる。図-13はトリクロロエチレンで汚染された地域の浅層地下水について、等濃度線を描いているが、

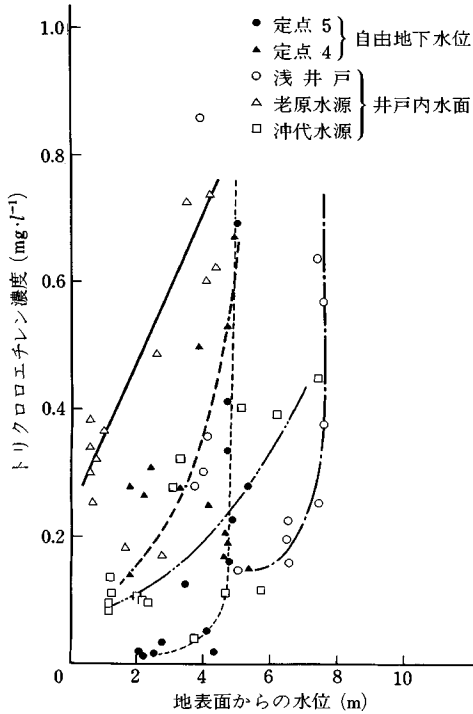


図-12 トリクロロエチレン濃度と地下水位との関係 (中辻, 1987)

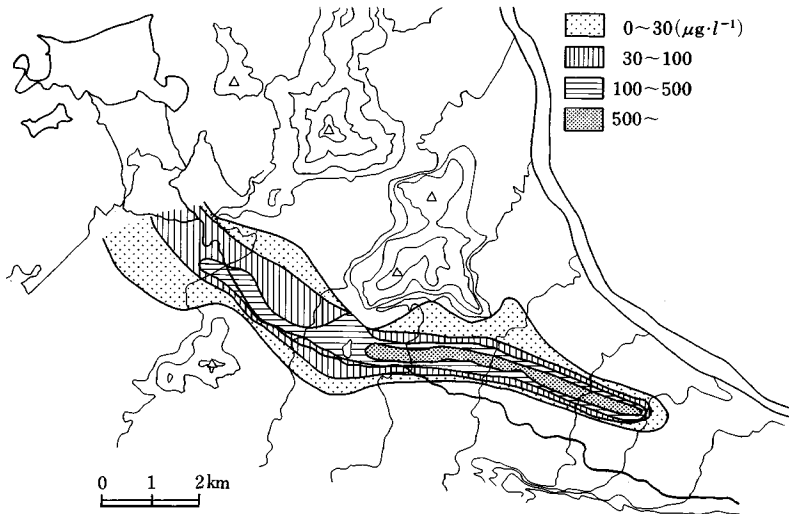


図-13 旧河道で観測されたトリクロロエチレンの濃度分布 (新藤ら, 1986)

新藤ら³³⁾はこの地域で地層比抵抗を測定し、等濃度線とほぼ同じパターンの高抵抗帯のあることを見出した。この結果から、汚染物質が高抵抗帯に相当する旧河道に沿って拡がったことを明らかにした。

またトリクロロエチレンなどの有機塩素化合物は揮発性の物質であり、これらの物質が地下水に含まれていると、不飽和空隙中に揮散し、地表面に達する。地表付近で土壤ガス中の成分を調べれば、間接的に地下にある物質を探知することができる。土壤ガスを指標とした地球化学探査では、通常土壤ガス成分を吸着剤に固定し、分析することになる。地球化学探査の最大の利点は土壤が露出していれば、山地でも市街地でも、どこでも調査が可能で、調査地域内の地下にある物質の相対的な濃度差や汚染の拡がりを把握できる点にある。

図-14はテトラクロロエチレンで汚染された湧水周辺の土壤ガス調査に、吸着剤として活性炭を用いた結果である³⁴⁾。調査地は標高800~1100mの山間にあり、井戸も表流水もない。こうした地域であっても土壤ガスを調べれば、湧水北方1.5kmにある廃棄物埋立地から湧水地点までに連続したテトラクロロエチレンの分布を明らかにすることができる。また吸着剤として、活性炭以外にもテナックスを使用した地球化学探査手法も開発されている³⁴⁾。

(4) シミュレーション解析

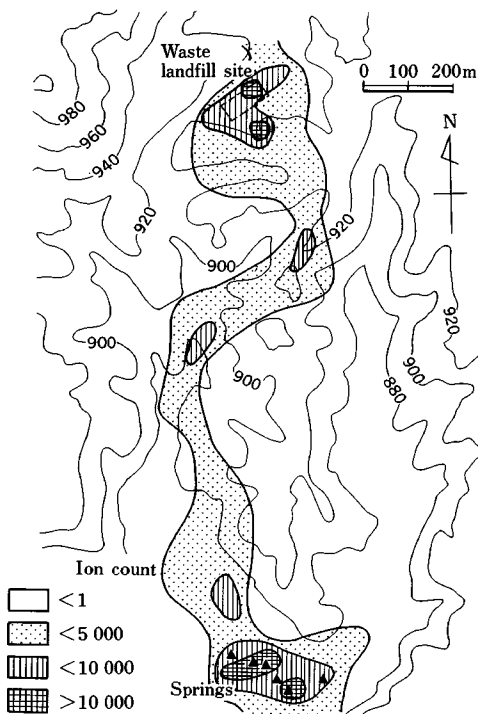


図-14 土壤ガス中のテトラクロロエチレンの分布

水平二次元の流れ場を考えることにすれば、地下水流れの連続式は

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kb \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kb \frac{\partial h}{\partial y} \right) = r \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。ここに、 x, y ：座標系、 k ：透水係数、 b ：帯水層厚、 h ：地下水の水位、 r ：流入と流出の差、である。また流速は次のダルシー則より計算される。

$$v = k \nabla h \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 v はダルシー流速ベクトル、 $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y$ である。地下水の流れは式(9)を解くことによって得られるが、これには大きく2つの方法がある。1つは、透水係数と境界条件、たとえば観測水位を与え、計算領域内の地下水位分布を求める方法(順問題)、いま1つは境界での流量と領域内の水位分布を与え、式(9)を満たす最適な透水係数の分布を推定する方法(逆問題)、である。いずれも流速は式(10)から計算される。汚染物質の移動については、式(10)で求めた速度場に分散係数(あるいは分散能)を与えて式(7)を解くか、モンテカルロ法で個々の粒子をラグランジュ的に追跡すればよい。

順問題では、境界条件と透水係数から一気に計算領域の流れ場を解くことができる。その反面、計算結果の再現性をよくするには、透水係数を操作しなければならないことがあり、この点に不確実性が残る。一方逆問題としての解法では、一見合理的な透水係数の分布が得られる。ところが、地下水位などの測定誤差が計算結果に強く反映され、負の透水係数が現われることさえある。こうした場合、平均操作や鉛直方向の水移動(揚水や下層への浸透)を考慮して、問題を回避することになるが、そのために計算結果をゆがめてしまう危険性がある。

図-15はテトラクロロエチレンで汚染された浅層地下水の実測等濃度線(A)と順問題として解いた等濃度線(B)を示している³⁵⁾。同図は縦分散能 $\alpha_L=50m$ 、横分散能 $\alpha_T=10m$ とし、3か所の汚染源から連続投入の条件で計算されている。またテトラクロロエチレンは土壤には吸着しにくい物質であり、微生物分解もよくわかっていないことから、式(7)の遅れ係数は $R_a=1$

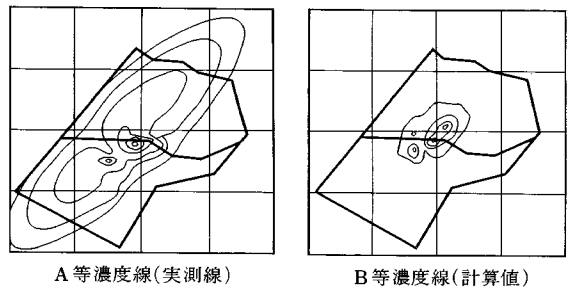
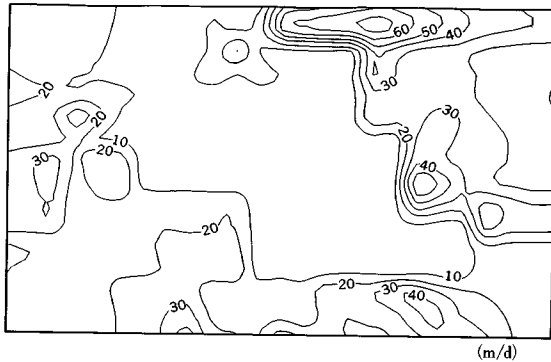


図-15 順問題としての解析例(古市, 1986)

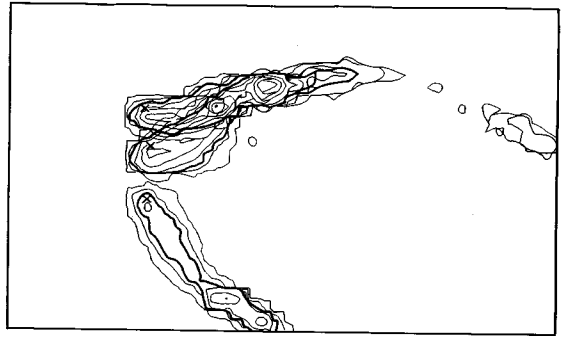


図—16 逆問題で解いた透水係数の分布 (計算領域は東西 6 km, 南北 3.6 km)

とし、右辺第 4 項の発生・消滅項は考慮されていない。図—15(B) 以外にも、汚染源の数と位置、連続投入と瞬間投入、分散能の値などのパラメーターを種々変化させて、膨大な計算がなされている。ところが計算結果の検討となると、拡散パターンをながめ、どの組合せが最も観測値を再現しているのか、定性的な議論にとどまっている。

逆問題の応用例もある。図—16 はトリクロロエチレンで汚染された台地の浅層地下水を対象に、逆問題として求められた透水係数の分布であり、図—17 はこの透水係数をベースにモンテカルロ法で拡散計算を行っている³⁶⁾。図—17 はいずれも 1 日 1 粒子ずつ投入し続ける連続投入の条件で、図中上から順に汚染源を 500 m ずつ下方にずらした結果である。また $\alpha_L=30\text{ m}$ 、 $\alpha_T=9\text{ m}$ とし、図—15 と同様遅れ係数や発生・消滅項は考慮していない。透水係数の分布は、既存の観測値からみて妥当と考えられる透水係数 50 m/d を境界に与え、推定された結果である。したがって図—16 は最も現実に近い流れを反映しているはずであるのに、シミュレーション結果では年数がたっても汚染雲の動きはにぶく、浅層から深層への水の吸い込みによって、物質が減少するのみであった。そこで、図—16 の値を 2.5 倍した流れ場で拡散計算したところ、ほぼ観測された汚染雲のパターンに近い図—17 (最上段) が得られた。さらに汚染源がわずかにずれただけでも、物質の移動方向が全く変わってしまう場合もあることがわかる。

このようにみると、数値シミュレーションは膨大な労力と時間が費やされる割に、結果は定性的な情報を提示するにとどまっている。ところが現実には数値シミュレーションに対する期待は大きく、是非とも今後に発展させなければいけない課題と考える。なぜなら、有機塩素化合物による地下水汚染問題は、汚染機構を解明しつつ、汚染源対策や浄化対策を講じる段階に入っている。



図—17 連続投入によるシミュレーションの結果

汚染されている状態がいつまで続くのか、汚染土壌の除去などの浄化対策が講じられたとき、効果があるのか、あるとすればいつ頃終わるのか、など早急に答えを出さなければいけないが、これらの問題は数値シミュレーションによる将来予測に頼らざるを得ないからである。計算機能力の向上はめざましく、シミュレーション手法の開発も進んでいる。これに比べて、透水係数や帯水層厚、地下水の流向・流速、分散能など、数値シミュレーションを行ううえで、必須要素の測定や決定手法はいかにも立ち遅れている。計算結果を論ずる前に、数値シミュレーションを支援する周辺の情報の整備が望まれているのである。

7. 地下水汚染の防止と改善に関する対策

(1) 応急的対策

TCEs の地下水汚染が生じた場合、その汚染機構の実態を把握し、汚染に伴う被害の程度、汚染の継続性をまず判断することが肝要である。この資料に基づいてとるべき対策が講じられるが、対策は技術的に可能で、費用効果が適切な実施可能なものでなければならない。大きく分けて、汚染が確認された直後あるいは短期的に実施可能な応急的対策と、恒久的対策とが考えられる。いずれの場合も汚染地域の特性がからむため、ここでは一般的な事項について述べる。

汚染被害が最も直接的なのは、飲料水を通じて TCEs が体内に侵入することで、このため汚染水源井戸の揚水を停止し、代替水源に切り換える。汚染された水道水をやむを得ず家庭などで利用するときは、煮沸により溶解した TCEs を空中に揮散させることが一時的には有効である。水道事業として代替水量が不足する場合には、汚染水を曝気して大気に揮散させ、なお必要があれば活性炭汚過を行い、後述の飲料水暫定基準濃度に達しないことを確認して供給される。現在、曝気装置をもつ水道事業機関も多い。

汚染源が判明し、かつ多量の汚染物がスポット的に存

在している場合には、積極的な揚水によって汚染物を取り除くのも1つの対策である。この場合、汚染域がごく限られておれば、その周囲を矢板あるいは土壌硬化剤で固め、汚染の拡がりを防止するとともに、中央部で揚水除去を行う。これと同時に、周辺から水を注入し、中央部に地下水を早く追いやるのも効果的である。

高濃度の汚染が明らかな汚染土壌を除去し、ビニールシート上に積み上げて風乾した例もある。この場合、風乾を促進させるためのかき回しや、降雨浸透による二次汚染のないよう適切な管理が必要である。

(2) 恒久的対策

広域的な TCEs の地下水汚染を改善することは容易でない。一般には濃度も低いが持続性があり、どこかにいまだ汚染源が潜んでいていつ果てるかわからないのが実情である。したがって、技術的な改善対策が行えるように、常に地下水汚染経路や侵入量を明らかにする調査などの努力が必要である。このために、シミュレーションの助けを借りることもあり得る。

このような背景で、最も基本的な対策といえば、汚染物質の地下侵入を未然に防止することであろう。いったん生じてしまうと回復の困難な現象であるため、次節に述べるように、行政的な分野からの対応も重要である。

8. 行政的な対応

これまで TCEs による地下水汚染は一貫した法的な対応がなく、昭和 57 年度環境庁調査の公表以来、国の各省庁および自治体ではさまざまな取り組みを行ってきた³⁷⁾。

厚生省では水道水源井戸でも TCEs 汚染が数多くみつけたことから、生活環境審議会水質専門部会の検討結果を受け、水道水の水質上の要件として暫定的に基準を設け、これを適用することとして 1984 年 2 月 18 日付で通達している。また水道では原則として 1 年以内に 1 回ずつこれら物質の低減を図ることとされ、これを受けて、各自治体水道関係部局でも詳しくその管理に当たっている。

環境庁では、地下水汚染機構は明らかでないものの、TCEs の地下浸透に起因する地下水の汚染を防止するための管理目標と、公共用水域に工場・事業場から TCEs の排水されたことを抑制することから、両者の目標値を設けて 1984 年 8 月 22 日付で暫定指導指針を出した。これを受けて、通商産業省は、TCEs を扱う工場・事業場に対して適切な排水対策を指導し、建設省では TCEs を含む排水が下水道に排出されるとききの排水中濃度を、管理目標として当面適合するよう指導した。これらの指示により、TCEs を含む廃棄物発生量が増加することが予想されるため、厚生省ではこれらの廃棄物の適正処理を

指導している。

一方、TCEs を使用する事業者に対し、これらを適正に使用するための指針となるべきマニュアルも作成されている。すなわち、テトラクロロエチレン等を扱うドライクリーニングのマニュアル（厚生省）では、溶剤の保管、充填、使用、回収、処理と排ガス排水についての管理が示されている。また、TCEs を扱う事業所の技術マニュアル（通商産業省）では、床面材質や構造、漏出防止技術、溶剤回収法、廃棄物・排水の適正処理法などを扱っている。以上、主な指導における管理目標値を示したのが表—3 である。

環境庁のその後の調査では、2. に述べたとおり、全国各地の TCEs 地下水汚染の判明がとどまるところを知らず、現在の法律ではこの汚染にかかわる地下水保全は十分でないことから、環境庁では法制度見直しを含む地下水保全対策のあり方についての検討を開始してきた。

地下水の質を保全するための現行法制度は、現在体系的な制度は確立されていないが、関連する主な法律には以下のようなものがある。①化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（1986 改）、②毒物及び劇物取締り法（1950）、③農薬取締法（1948）、④有害物質を含有する家庭用品の規制に関する法律（1973）、⑤労働安全衛生法（1972）、⑥消防法（1948）、⑦建築基準法（1950）、⑧鉱山保安法（1949）、⑨公害対策基本法（1968）、⑩水質汚濁防止法（1970）、⑪下水道法（1958）、⑫廃棄物の処理及び清掃に関する法律（1970）、⑬浄化槽法、⑭農用地の土壌の汚染防止などに関する法律（1970）。

このうち TCEs の多くを人の健康障害の防止という観点から規制の対象物として（現在では指定物質として）取り上げているのは、3. でも述べたとおり、①の「化審法」においてである。またトリクロロエチレン、テトラクロロエチレンを規制対象物質と定めているのは④、⑤のみである。「廃掃法」と略称されている⑬では、地下水質の保全に係るものについては、一般廃棄物処理施設（ごみ処理施設、し尿処理施設に対して）については「汚水または廃液が、漏れ出し、地下に浸透しない構造のものであること」の基準が定められている。産業廃棄物の処理施設については、たとえば汚泥の脱水施設では、「床又は地盤面が、不透水性の材料で築造され、又は被覆されていること」と基準が定められているが、これによって有害とみられる物質の地下水侵入の防止を暗に示している程度である。

このように地下水保全に関していくつかの法律に関連する事項があるが、公害防止の基本法たる「公害対策基本法」において、湖や河川の表流水と同様に地下水域もその公共用性を認めながらも、地下水の環境基準をすぐ

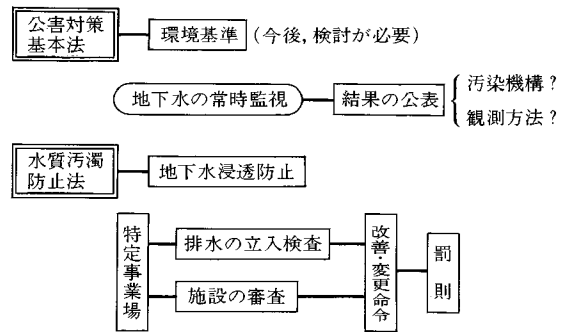
表—3 トリクロロエチレン等の管理目標値

	目 的	トリクロロエチレン	テトラクロロエチレン	1, 1, 1-トリクロロエタン
厚生省 (1984. 2. 18)	水道水暫定基準値	0.03 mg/l 以下	0.01 mg/l 以下	0.3 mg/l 以下
環境庁 (1984. 8. 22)	地下浸透の防止に関する管理目標	0.03 "	0.01 "	0.3 "
	公共用水域への排出の抑制に関する管理目標	0.3 "	0.1 "	3.0 "
通商産業省 (1984. 8. 22)	地下浸透の防止に関する管理目標	0.03 "	0.01 "	0.3 "
	公共用水域への排出の抑制に関する管理目標	0.3 "	0.1 "	3.0 "
建設省 (1984. 8. 22)	下水道への排水の管理目標	0.3 "	0.1 "	3.0 "

には決められない、あるいは決める必要性に至っていないという受け止め方になっている。確かに、地下水汚染においては、その改善対策技術が保証されてもいないし、汚染物質の使用を現今で禁止することもできない情勢にあることは間違いない。この法律の水質保全の目的を扱う「水濁法」⑩においては、公共用水域の汚濁の防止と健康被害が発生したときの被害者の保護の立場から、その第14条第5項において、有害物質（人の健康に係わる被害を生じおそれのある物質）を含む汚水等が地下にしみ込むことのないように適切な措置をとらなければならない、とされ、地下水汚染の防止にふれている。しかし、同規定の実行性を担保するために、たとえば改善を命令したり違反に対する罰則の規定はなく、法的に完全な体制にはなっていない。さらに今問題とするTCEs、特にトリクロロエチレンとテトラクロロエチレンは、現在、有害物質としての有害性が確立しているものではないため、前述の有害物質による地下水汚染の対象にもなっていない。しかしこれまで繰り返して述べたTCEsの地下水汚染性状の重大さに鑑み、有害性の有無の確定前であっても地下水の汚染を惹起する可能性のある行為を法的に規制すべきとして、「水質汚濁防止法」の一部を改正してこれに対処しようというのが環境庁の現在の方針である。

現在検討され、近い将来制定の方向にある有害物質としてのTCEsの一部に関する地下水質保全の法的措置を簡単にまとめれば、図—18のごとくである。「公害対策基本法」による地下水域の環境基準の設定については、今後検討されるべき課題であるが、法的に規定された有害物質およびトリクロロエチレンおよびテトラクロロエチレンの地下浸透防止の立場から、地下への排出基準等が設定され、それらを扱う事業所に対して立入検査と施設審査を行い、それに違反する場合は改善・変更の命令ができ、罰則を処することになる。

一方、地下水汚染を未然に防止し、良好な地下水の水質を維持するためには、地下水の水質状況を把握し、地



図—18 地下水質保全に関する措置の体系概要

方公共団体の協力を得て、統一的・効率的な監視測定が行われなければならない。この意味で、すでに述べたが、いまだ説明が進んでいない汚染機構に関する研究と、観測方法、すなわち観測地域、観測地点、観測頻度、観測手法について科学的な追求が必要である。

また、地下水汚染が生活に密接に関係している以上、地域の調査資料の公表も1つの行政の義務である。すなわち、測定計画に基づく監視測定結果については、国民が地下水の水質状況の理解を深めるために、公共用水域と同様に公表するのが適切である。TCEsは発ガン性の疑いをもつ物質であるから、それゆえに正しく汚染の実態を認識し、住民の健康リスクを理解し、リスクを排除するためにも汚染の未然防止対策の必要性を喚起することに役立つものでなければいけない。しかしながら、地下水の監視のために多くの観測井を建設することは現実にはできず、現在使用されている民間の井戸を調査に利用する方法が主体となる。したがって、汚染井戸の所有者が汚染原因者とは限らないので、関係者の正当な利益を保護する意味からも、公表の方法は適切でなければならない。

住民への周知は迅速かつ正確であるのは当然であるが、そのような情報をまとめるにはそれなりの準備が必要である。考えられる項目としては、汚染物質の種類と

名称, 汚染物質濃度, 汚染範囲, 物質の物理化学的性状, 物質の用途, 汚染原因などがある。そして, これらの内容に基づいて防除対策を示すことが必要である。

9. 地下水汚染と関連する問題

廃棄物は, 一般廃棄物と産業廃棄物に分けられ, 適正な処理を経て最終処分場に埋め立てられる。最終処分場の構造には遮断型, 管理型, 安定型があり, 有害物質を含み得る廃棄物のこれらの処分法にかかわる環境問題も種々ある³⁸⁾。この中で, 埋立地からの浸出液によって公共の水域および地下水が汚染される問題について, 十分な対処が必要となろう。

地下水の人口涵養にはいろいろな目的と方法がある。第一に水資源の確保ということで, 大規模なものとしては地下ダムの建設が考えられる³⁹⁾。第二に地下水利用によって生ずる地下水循環系のひずみを回復するための再注入で, 農業用水の再注入⁴⁰⁾, 開発工事等に伴う湧き水の再注入, 融雪用水の再注入等がある。また都市域では, 舗装面の増大による雨水の地下浸透不足を補うための浸透性舗装や雨水ますからの地下浸透, それに積雪地帯の都市域では, 除雪後の雪を融水にして地下へ還元させることなども考えられている。いずれの場合にも注入による地下水汚染が問題となり得るが, 農業用水の再注入にかかわる水質問題は特に欧米の農業地帯では深刻な問題である⁴¹⁾。

湖沼の富栄養化問題では, 流入栄養塩のカットがその防止対策の基本であり, 下水道の普及が望まれている。しかし現状では下水道のない地域での生活雑排水対策が急務であり, このため合併処理槽の取り付けなどが指導されているほか, 土壌浸透処理も行われている。この処理法においては, リンは土壌への吸着による除去が可能であるが, 硝酸態窒素についてはその脱窒を効果的にしないと地下へ浸透し, 地下水汚染を生ずることが知られている。

すでに述べた昭和 57 年度の環境庁による TCEs 地下水水質調査において, 硝酸態窒素の濃度も同時に調査されている。その結果, 全国 10 都市の井戸で 10 mg/l (飲料水の基準) を超えた井戸の率は 9% で, TCEs の超過率よりずっと高いものであった。このような都市域での硝酸態窒素による汚染の原因は何であるかは調べられていない。一方, 農業地域, 特に畑地における余剰農肥等の浸透と考えられる硝酸態窒素の地下水汚染は, すでに欧米では大きな問題となっている⁴²⁾。わが国でも畑地の地下水汚染がみられるところがあり⁴³⁾, この種の地下水汚染問題も今後拡大するのではないかとみられる。

10. おわりに

新しい型の地下水汚染として TCEs による汚染を中心に述べてきた。この汚染は, 工業立地の先進国において, 今後も拡大していくことは確実であろう。アメリカにおいても地下水質保全に関してかかえている問題は大きく, 日米環境合同企画調整委員会において, わが国と地下水汚染についての保全対策のあり方が議論されている⁴⁴⁾。もちろん, 発展途上国においてもこの種の汚染がないわけではない。世界保健機構 (WHO) が TCEs を含む有害化学物質の健康影響問題を国際的に指導しているが, 住民の TCEs に対する健康リスクの認識は先進国の方が随分高い。濃度が低い場合でも, 自分たちの住んでいる地下に聞きなれぬ化学物質が存在しているというだけでもリスク認識が高まることもあろう。しかし, 人の健康に及ぼす影響には変わりがないから, 国際的に広く有害な化学物質の管理がなされることが望まれる。

低濃度で広域的な汚染を示しているこの地下水汚染は, 最も改善対策が講じにくいものと考えられよう。したがって, 汚染を未然に防止することが基本であるが, 将来, 有用性を損なわず, より低毒性の物質に切り換える工夫がなされるべきである。また廃棄物の処理に関して, 微生物分解による無害化処理の技術開発を促進する必要もあろう。

最後に, 本稿をまとめるにあたって種々の資料作りに協力して頂いた国立公害研究所 平田健正主任研究員に深く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 矢部禎昭: 地下水汚染事例, 月刊「水」, 新年増刊号, pp. 106~120, 1983.
- 2) 藤縄克之: 諸外国の地下水汚染, 地質学論集, 第 23 号, pp. 115~121, 1983.
- 3) 楡井 久・佐藤賢司: 地下水汚染の原因調査とその対策 (その 1)(その 2), 地下水と井戸とポンプ, Vol. 28, No. 5, pp. 14~26, Vol. 28, No. 6, pp. 3~15, 1986.
- 4) 田瀬則雄: 日本における地下水汚染の発生状況, ハイドロロジー, 第 18 巻, 第 1 号, pp. 1~13, 1988.
- 5) 上阪政章: シリコン・バレーにおける地下水汚染対策, 公害と対策, Vol. 22, No. 4, pp. 337~343, 1986.
- 6) 村田徳治: 環境汚染と化学物質, 第 1 回・石炭から生まれた人口化学物質, 公害と対策, Vol. 22, No. 4, pp. 365~372, 1986.
- 7) (社) 日本化学物質安全・情報センター: IC 産業環境保全実態調査 (化学物質物性調査), 昭和 61 年度環境庁委託業務結果報告書, 昭和 62 年 3 月.
- 8) 中杉修身: 有機塩素化合物の環境への侵入形態, 文部省「環境科学」研究報告集, B293-R 12-14, pp. 19~27, 1986.
- 9) 村岡浩爾: 有機塩素化合物の地下水汚染に関する実験的研究, ハイドロロジー, 第 16 巻, 第 2 号, pp. 59~66,

- 1987.
- 10) 村岡浩爾：地下水汚染対策の新たな進展，第12回日本水質汚濁研究協会セミナー講演資料集，pp.68~78，東京，1988.
 - 11) 村岡浩爾：有機ハロゲン物質の地下水中の流動特性について，水質汚濁研究，Vol.8，No.5，pp.274~281，1985.
 - 12) Muraoka, K. and Hirata, T. : Hydraulic Behavior of Chlorinated Organic Compounds in Water, Water Research, Vol.22, No.4, pp.485~489, 1988.
 - 13) Hirata, T. and Muraoka, K. : Vertical Migration of Chlorinated Organic Compounds in Porous Media, Water Research, Vol.22, No.4, pp.481~484, 1988.
 - 14) 神野健二・上田年比古・榎井和朗・大石秀人・安田 裕：テトラクロロエチレンによる地下水汚染についての水文地質学的考察，日本地下水学会誌，第28巻，第3号，pp.113~125，1986.
 - 15) Schuille, F. : Groundwater Pollution in Porous Media by Fluids Immiscible with Water, The Science of the Total Environ., No.21, pp.173~185, 1981.
 - 16) 平田健正：地下水汚染(4)，有機塩素化合物による地下水汚染，地下水学会誌，第30巻，第4号，pp.223~230，1988.
 - 17) 村岡浩爾：(内部資料)，1989.
 - 18) Todd, D.K. : Groundwater Hydrology, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1980.
 - 19) Bear, J. : Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill Book Co., 1979.
 - 20) Pinder, G.F. and Gray, W.G. : Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, Academic Press, 1977.
 - 21) Yaron, B., Dagan, G. and Goldshmid, J. : Pollution in Porous Media, Ecological Studies 47, Springer-Verlag, 1984.
 - 22) National Research Council : Groundwater Contamination, Studies in Geophysics, National Academy Press, 1984.
 - 23) 新藤静夫：地下水汚染(1)，その地球科学的立場からのアプローチ，地下水学会誌，第30巻，第1号，pp.35~42，1988.
 - 24) 合田 健：水質環境科学，丸善，pp.381~408，1985.
 - 25) Fried, J.J. : Groundwater Pollution, Elsevier, 1975.
 - 26) Streeter, V.L. : Handbook of Fluid Dynamics, McGraw-Hill Book Co., 1961.
 - 27) Roberts, P.V., Reinhard, M. and Valocchi, A.J. : Movement of organic contaminants in groundwater; implications for water supply, J. American Water Works Assoc., pp.408~413, Aug., 1982.
 - 28) Mackay, D.M., Roberts, P.V. and Cherry, J.A. : Transport of organic contaminants in groundwater, Environ. Science and Technology, Vol.19, No.5, pp.384~392, 1987.
 - 29) Roberts, P.V., Schriener, J. and Hopkins, D. : Field Study of Organic Water Quality Changes during Groundwater Recharge in Palo Baylands, Water Research, Vol.16, pp.1025~1035, 1982.
 - 30) 内山裕夫・矢木修身：揮発性有機ハロゲン化合物の好気的生分解，第3回土壌・地下水汚染シンポジウム報告集，F-2-'88，国立公害研究所，pp.83~89，1988.
 - 31) 永井 茂・石井武政・黒田和男：熊本平野の地下水の水文化的研究，工業用水，第296号，pp.27~43，1983.
 - 32) 中辻啓二：有機塩素化合物による地下水汚染の時間的・空間的拡がり，土木学会論文集，第367号/II-8，pp.145~152，1987.
 - 33) 新藤静夫・唐 常源・杉江弘行：地下水環境における地形，地質要因と物質の挙動，及びそれらにかかわる人為的要因について，文部省「環境科学」研究報告集，B293-R12-14，pp.79~99，1986.
 - 34) 村岡浩爾・平田健正：有機塩素化合物の浸透・溶解実験と地下水汚染機構，第33回水理講演会論文集，土木学会，pp.247~252，1989.
 - 35) 古市 徹：地域地下水汚染の特性とその数値解析，第1回土壌・地下水汚染シンポジウム報告集，国立公害研究所，pp.31~41，1986.
 - 36) 村岡浩爾・平田健正・福島武彦：地域地下水汚染とその特性—水中および多孔体における物質浸透実験と地域汚染シミュレーション，第1回土壌・地下水汚染シンポジウム報告集，国立公害研究所，pp.17~30，1986.
 - 37) 中杉修身：有機塩素化合物による地下水汚染とその対策，生態化学，Vol.8，No.4，pp.3~12，1986.
 - 38) 滝村 朗：廃棄物の最終処分とその基準，環境情報科学，Vol.16，No.1，pp.2~8，1987.
 - 39) 富田友幸・細谷裕士・今泉真之：地下水入門・新知識技術(その5)，地下水人工涵養・地下ダム，農業土木学会誌，第55巻，第7号，pp.657~662，1987.
 - 40) 三野 徹：地下水入門・新知識(その8)，農地と地下水涵養，農業土木学会誌，第55巻，第10号，pp.977~983，1987.
 - 41) Asano, T. : Artificial Recharge of Groundwater, Butterworth Publishers, 1985.
 - 42) 環境庁長官官房国際課：OECD 環境の状況報告書第II部第9章農業，季刊環境研究，第59号，pp.125~133，1986.
 - 43) 村岡浩爾・平田健正・岩田 敏：畑地における水分と物質の移動特性に関する研究，(I)観測結果と検討，(II)水収支・物質収支の数値シミュレーション，国立公害研究所研究報告，第94号，pp.93~117，1986.
 - 44) 早川哲夫：地下水質保全行政の現状と今後の動向，かんきょう，第13巻，第2号，pp.8~12，1988.

(1989.3.11・受付)